

# Indicateurs et méthodes de conception avancées en vue d'accroître la durabilité des services énergétiques urbains

Prof. D. Favrat, C. Weber

Urbistique 2006, Lausanne



# Problématique posée

Définir un système énergétique optimal afin de satisfaire les besoins d'un quartier en électricité, chauffage, eau chaude sanitaire et climatisation.

Questions:

Que signifie “optimal”?

Comment classifier le système énergétique?

Nécessité de définir des outils pour:

Caractériser les systèmes énergétiques

Structurer les informations concernant les systèmes énergétiques



# Structuration de la présentation

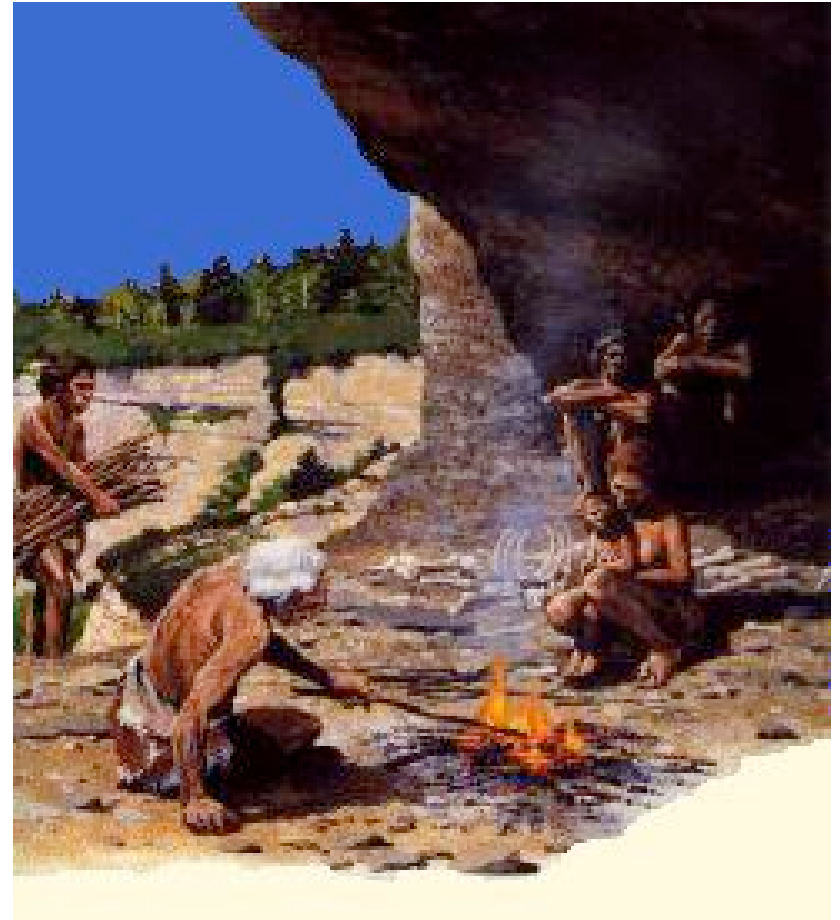
1. Caractériser les systèmes énergétiques => Exergie
2. Structurer les informations concernant les systèmes énergétiques => Optimisation
3. Conclusions



# Combustion et chauffage

**Combustion simple pour le chauffage  
(depuis environ 400000 années)**

**Système toujours utilisé aujourd'hui  
(chaudières)**



**Efficacité moyenne Premier Principe chaudière = environ 92% (PCI)**



# Exergie: définition

L'**exergie** associée à un transfert ou à un stock d'énergie est définie comme le **potentiel travail maximal** qu'il serait idéalement possible de tirer de chaque unité énergétique transférée ou stockée (à l'aide de cycles réversibles utilisant l'atmosphère comme une des deux sources - froide ou chaude).

L'approche exergétique permet de **quantifier** de façon cohérente à la fois la **quantité et la qualité** des différentes formes d'énergie mises en jeu.

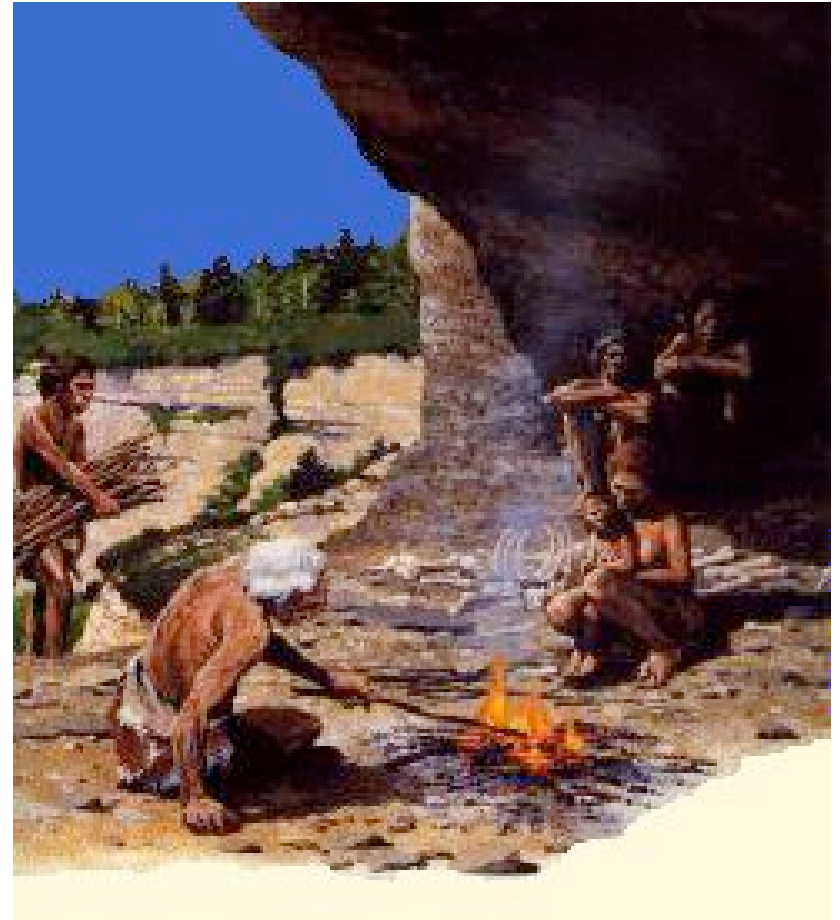
L'exergie présente le grand avantage de pouvoir définir des rendements qui sont adaptables à toutes les situations (couplage chaleur-force, trigénération, réfrigération, pompe à chaleur, etc.) et pour tous les domaines d'utilisation de l'énergie. Ces **rendements, qui sont toujours inférieurs à 100%**, donnent une appréciation de la qualité relative de différents concepts techniques.



# Combustion et chauffage

**Combustion simple pour le chauffage  
(depuis environ 400000 années)**

**Système toujours utilisé aujourd'hui  
(chaudières)**



**Efficacité moyenne Premier Principe chaudière = environ 92% (PCI)**

**Efficacité exergétique (2ème principe) = environ 16% (pour une température moyenne de chauffage de 60°C)**

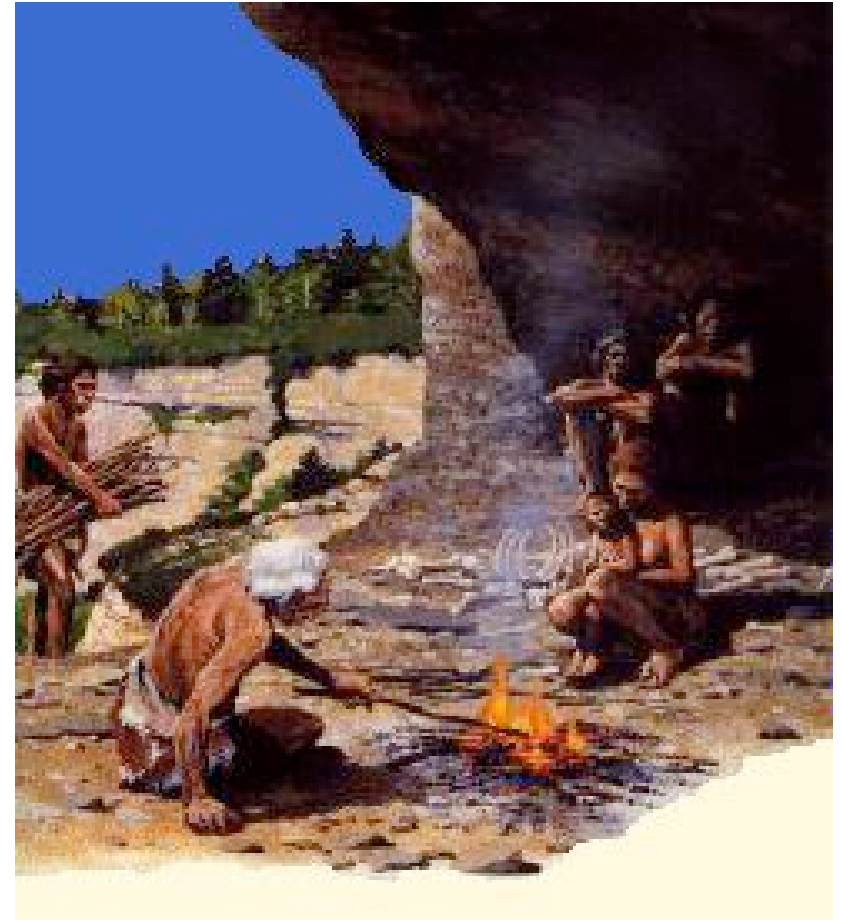


# Combustion et chauffage

**Combustion simple pour le chauffage  
(depuis environ 400000 années)**

**Système toujours utilisé aujourd'hui  
(chaudières)**

**Est-ce réellement une technologie  
digne du 21<sup>ème</sup> siècle?**



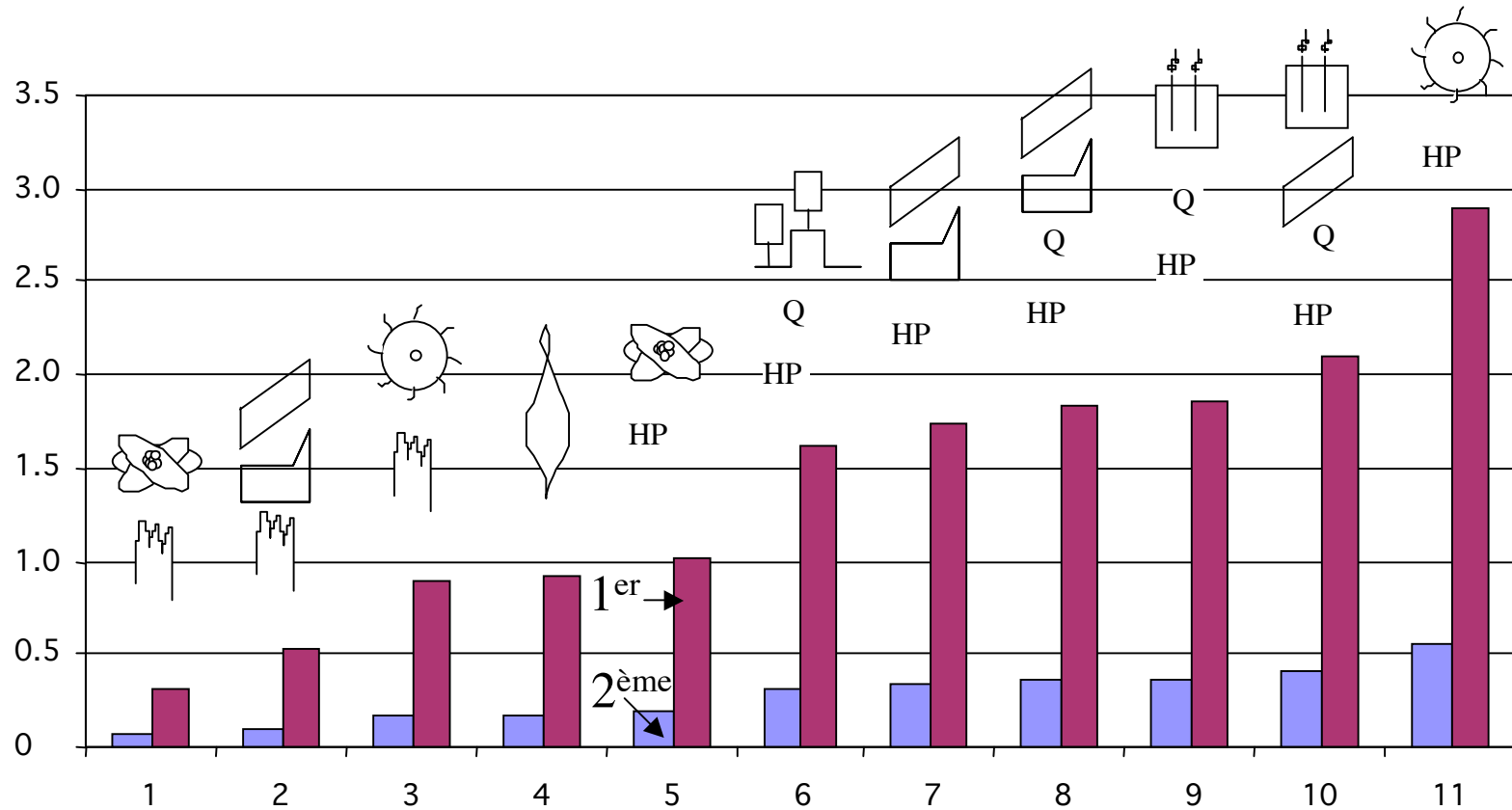
**Efficacité moyenne Premier Principe chaudière = environ 92% (PCI)**

**Efficacité exergétique (2ème principe) = environ 16% (pour une température  
moyenne de chauffage de 60°C)**



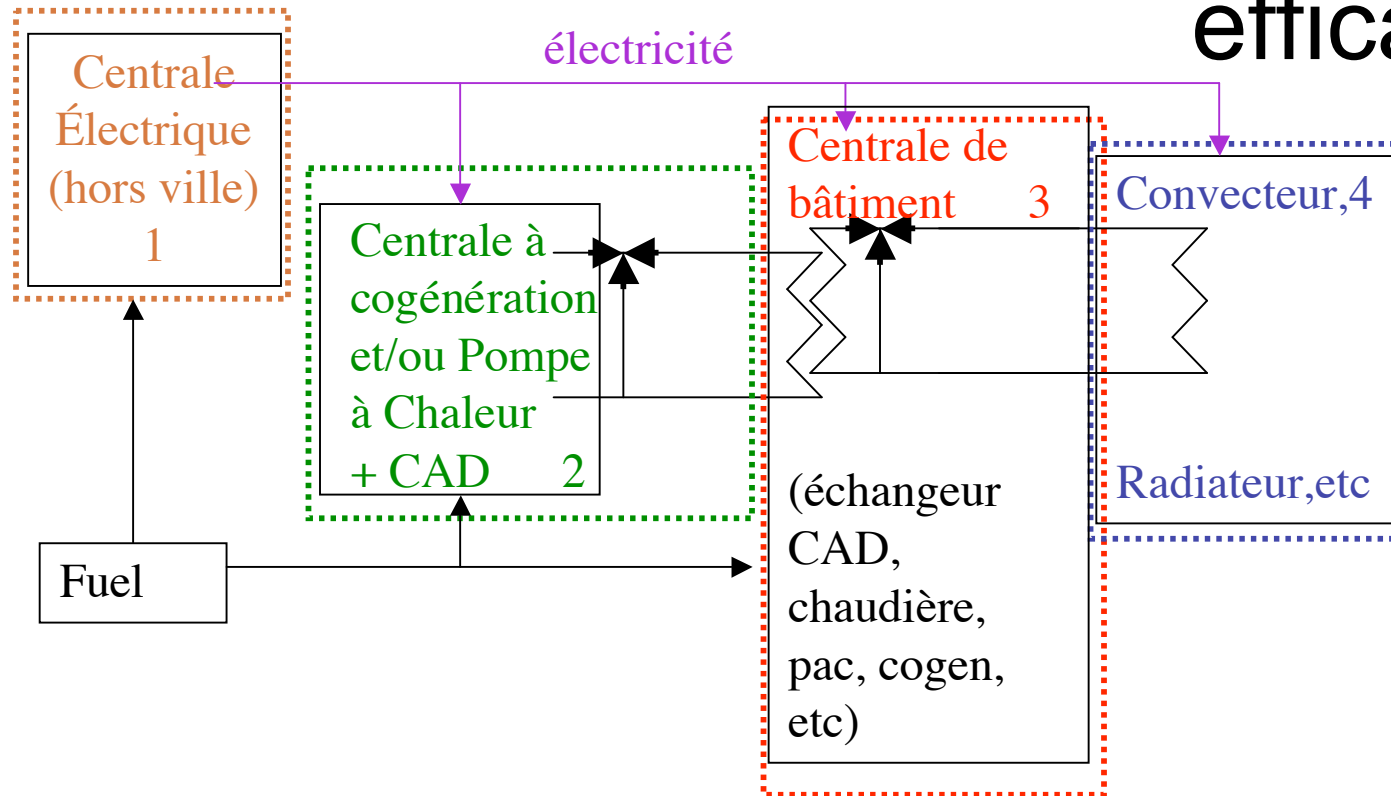
# Efficacités Premier et Deuxième principe de chauffage

Efficacités premier et deuxième principe





# Exergie: Multiplication des efficacités



$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4$$

Exemple: centrale à cycle combiné sans cogénération (1)+pompe à chaleur de réseau de CAD(2)+échangeur CAD de bâtiment (3) +convecteur (4)

$$\eta = \left( \frac{\dot{E}_{el,1}^-}{\dot{E}_{y,1}^+} \right) \left( \frac{\dot{E}_{y,2}^-}{\dot{E}_{el,2}^+} \right) \left( \frac{\dot{E}_{y,3}^-}{\dot{E}_{y,3}^+} \right) \left( \frac{\dot{E}_{q,4}^-}{\dot{E}_{y,4}^+} \right) = \frac{\dot{E}_{q,4}^-}{\dot{E}_{y,1}^+}$$



# Exemples d'application: chauffage

Technologies	centrale électrique	centrale CAD	centrale de bâtiment			convecteur			rendement global (%)		
gamme de températures			45-35	65-55	75-65	45-35	65-55	75-65	45-35	65-55	75-65
chaudière de CAD		0.2	<b>0.54</b>	<b>0.76</b>	<i>0.86</i>		<b>0.38</b>	<i>0.33</i>	<b>5.8</b>	<b>5.8</b>	<i>5.8</i>
chaudière de bâtiment sans condensation			<b>0.11</b>	<b>0.16</b>	<i>0.18</i>	<b>0.53</b>	<b>0.38</b>	<i>0.33</i>	<b>6.1</b>	<b>6.1</b>	<i>6.1</i>
chaudière de bâtiment avec condensation			<b>0.12</b>			<b>0.53</b>			<b>6.6</b>		
pompe à chaleur avec CAD (el nucléaire)	0.32	0.61	<b>0.53</b>	<b>0.76</b>	<i>0.86</i>	<b>0.33</b>	<b>0.33</b>	<i>0.33</i>	<b>5.5</b>	<b>5.5</b>	<i>5.5</i>
pompe à chaleur électrique (el nucléaire)	0.32		<b>0.45</b>	<b>0.45</b>	<i>0.45</i>	<b>0.53</b>	<b>0.38</b>	<i>0.33</i>	<b>7.6</b>	<b>5.4</b>	<i>4.8</i>
moteur à cogénération et pompe à chaleur			<b>0.22</b>	<b>0.25</b>	<i>0.26</i>	<b>0.53</b>	<b>0.38</b>	<i>0.33</i>	<b>11.8</b>	<b>9.4</b>	<i>8.7</i>
pompe à chaleur avec CAD (él de cc sans cogen)	0.54	0.61	<b>0.54</b>	<b>0.76</b>	<i>0.86</i>	<b>0.53</b>	<b>0.38</b>	<i>0.33</i>	<b>9.4</b>	<b>9.4</b>	<i>9.4</i>
pompe à chaleur électrique (el de cc sans cogen)	0.54		<b>0.45</b>	<b>0.45</b>	<i>0.45</i>	<b>0.53</b>	<b>0.38</b>	<i>0.33</i>	<b>12.9</b>	<b>9.2</b>	<i>8.1</i>
pompe à chaleur (el. de cc avec cogen)		0.55	<b>0.45</b>	<b>0.45</b>	<i>0.45</i>	<b>0.53</b>	<b>0.38</b>	<i>0.33</i>	<b>13.2</b>	<b>9.4</b>	<i>8.3</i>
pile à combustible avec cogen et pompe à chaleur			<b>0.25</b>	<b>0.27</b>	<i>0.28</i>	<b>0.53</b>	<b>0.38</b>	<i>0.33</i>	<b>13.4</b>	<b>10.4</b>	<i>9.5</i>
pompe à chaleur avec CAD (él. hydraulique)	0.88	0.61	<b>0.54</b>	<b>0.76</b>	<i>0.86</i>	<b>0.53</b>	<b>0.38</b>	<i>0.33</i>	<b>15.4</b>	<b>15.4</b>	<i>15.4</i>
pompe à chaleur électrique (el hydraulique)	0.88		<b>0.45</b>	<b>0.45</b>	<i>0.45</i>	<b>0.53</b>	<b>0.38</b>	<i>0.33</i>	<b>21.2</b>	<b>15.1</b>	<i>13.3</i>



# Exemple d'application: climatisation

(hypothèse : réfrigération à compression à alimentation électrique de rendement de 40%)

Technologies de production d'électricité	centrale électrique	centrale de bâtiment			convecteur			rendement global (%)		
gamme de températures		10-15	5-10	0-5	10-15	5-10	0-5	10-15	5-10	0-5
nucléaire	0.32	<b>0.40</b>	<b>0.40</b>	<i>0.40</i>	<b>0.56</b>	<b>0.43</b>	<i>0.34</i>	<b>7.1</b>	<b>5.4</b>	<i>4.3</i>
moteur à gaz	0.36	<b>0.4</b>	<b>0.40</b>	<i>0.40</i>	<b>0.56</b>	<b>0.43</b>	<i>0.34</i>	<b>8.1</b>	<b>6.2</b>	<i>4.9</i>
cc sans cogénération	0.54	<b>0.4</b>	<b>0.4</b>	<i>0.46</i>	<b>0.53</b>	<b>0.38</b>	<i>0.33</i>	<b>12.1</b>	<b>9.3</b>	<i>7.3</i>
hydraulique	0.88	<b>0.4</b>	<b>0.4</b>	<i>0.4</i>	<b>0.53</b>	<b>0.38</b>	<i>0.33</i>	<b>19.8</b>	<b>15.2</b>	<i>12.</i>



## Conclusion intermédiaire

- Favoriser des systèmes énergétiques intégrés et donc complexes
- Chauffer à basse température
- Climatiser à haute température



# Optimisation

Permet de structurer l'information concernant l'ensemble des solutions d'un système énergétique complexe ( réseau, centrale, etc.)

# Optimisation

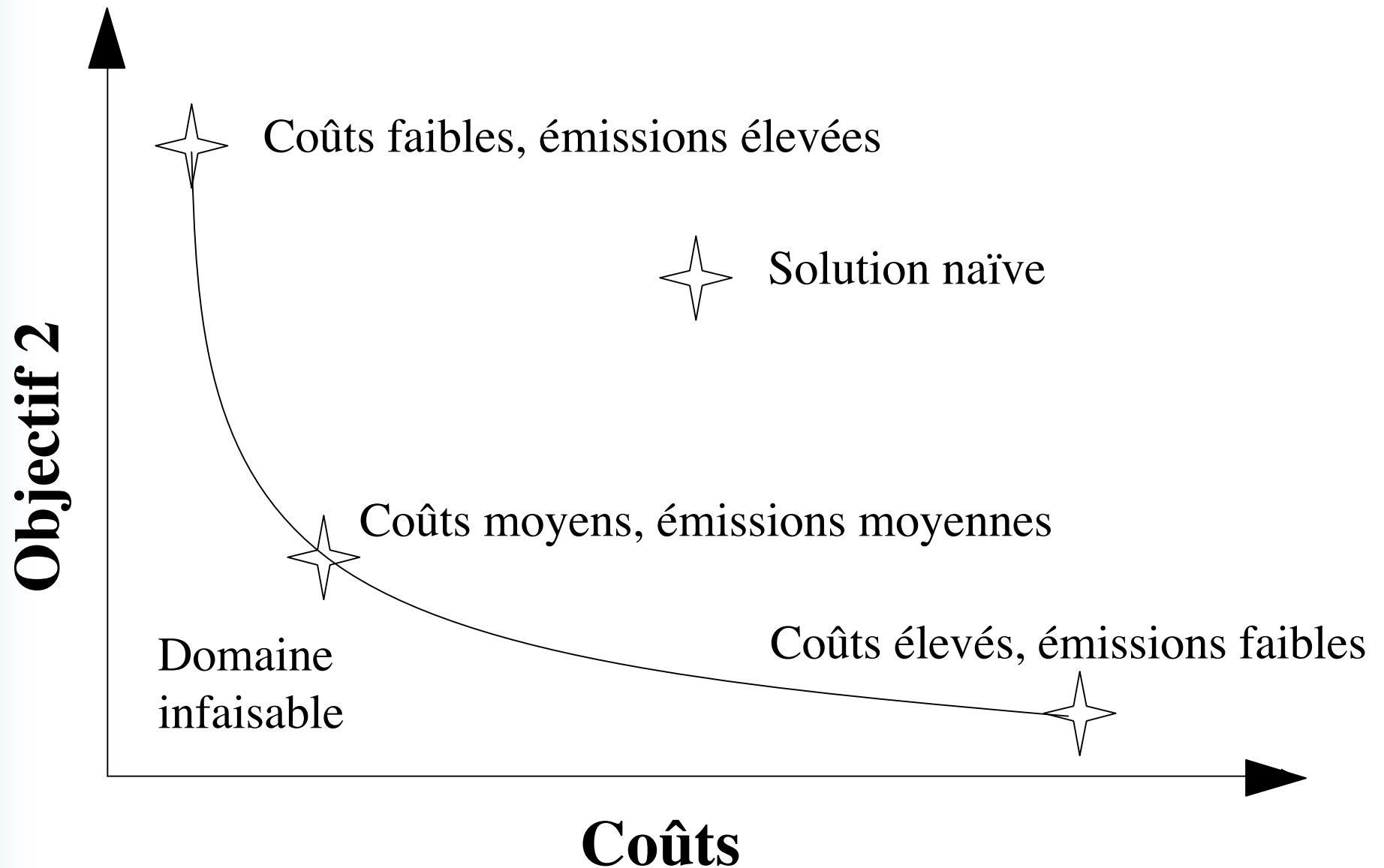
Permet de structurer l'information concernant l'ensemble des solutions d'un système énergétique complexe ( réseau, centrale, etc.)

## Optimisation multi-objectifs



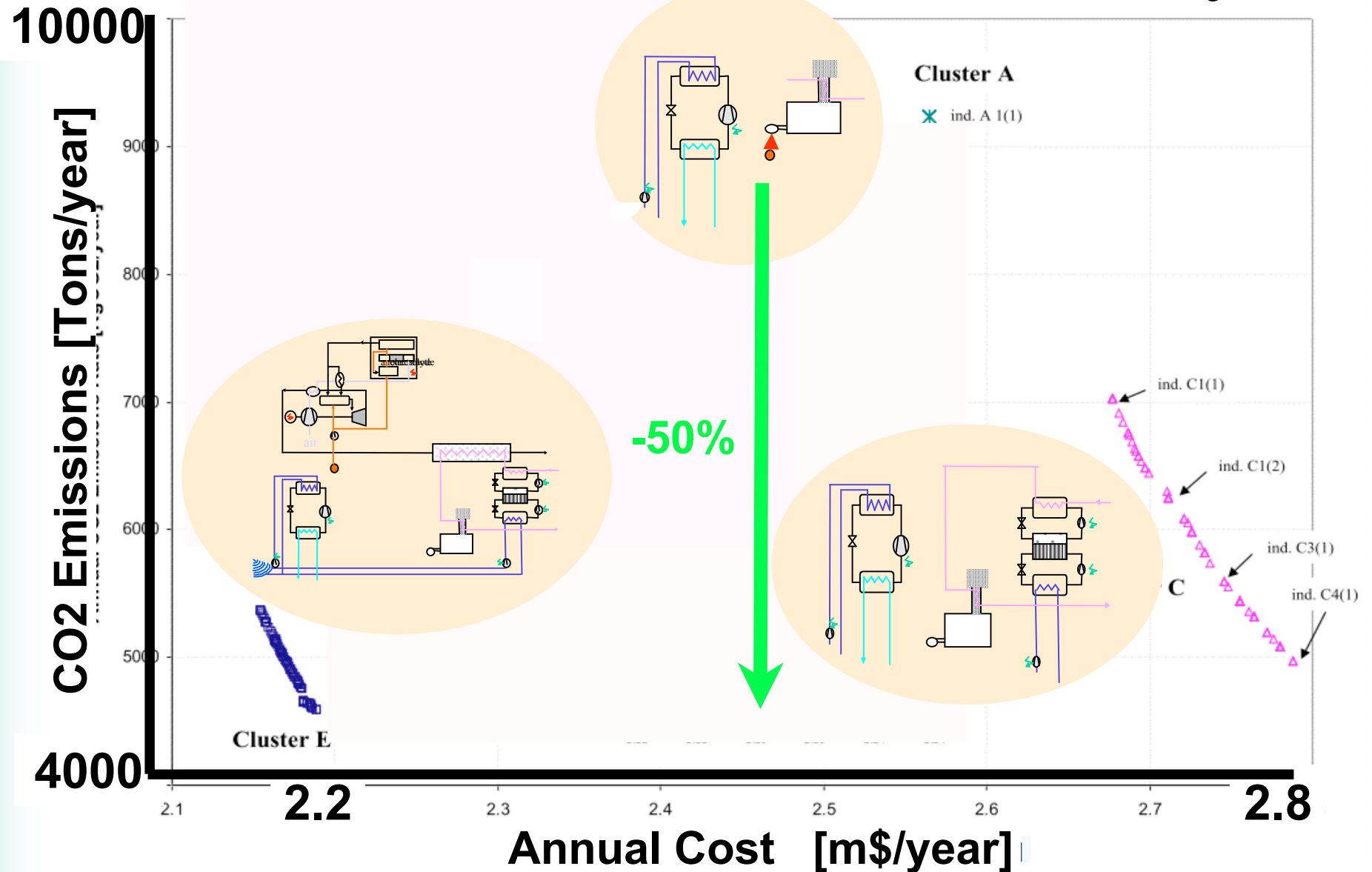
Vilfredo Pareto  
(1848-1923)

# Courbe Pareto



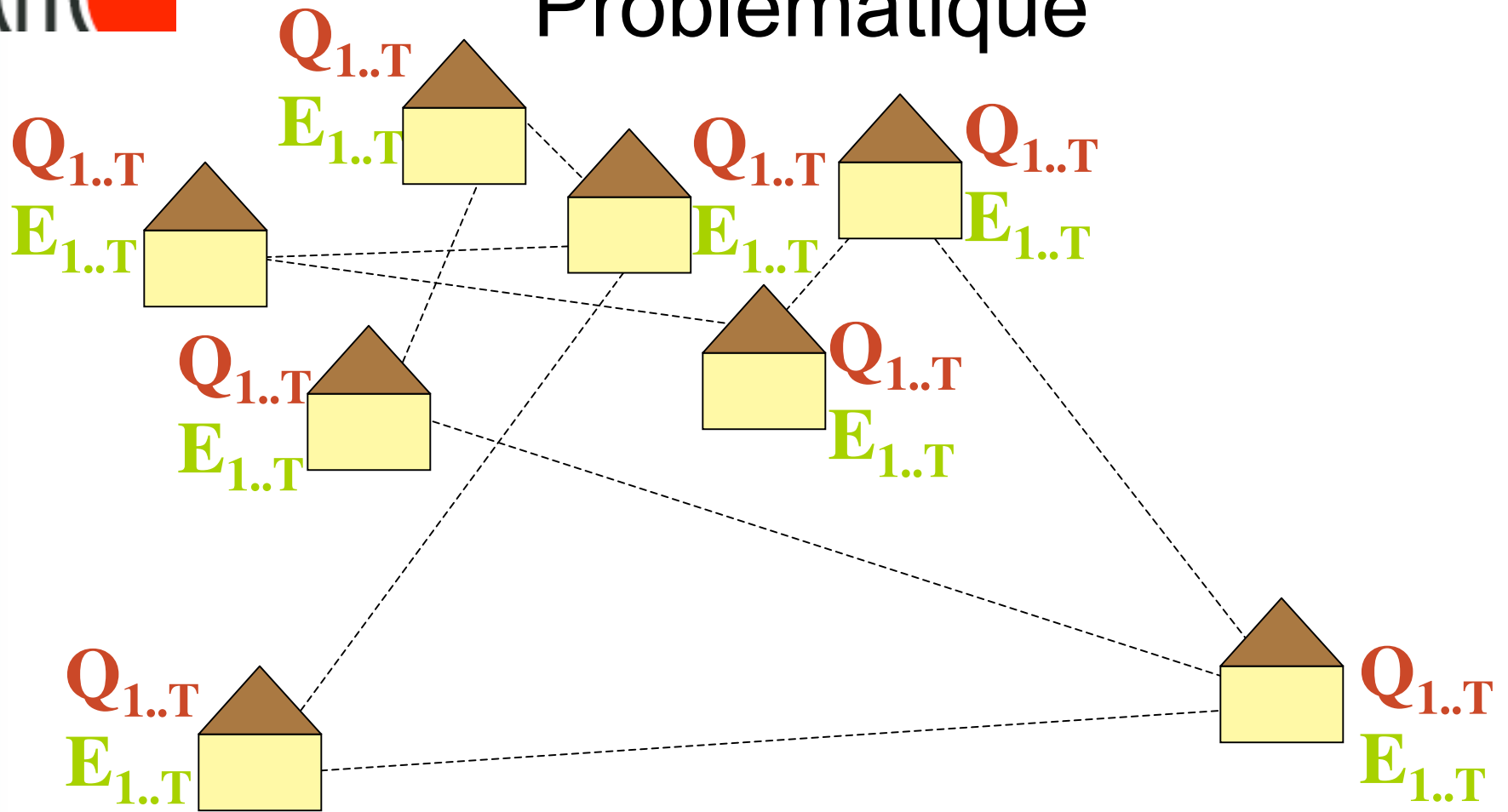


# Courbes Pareto à l'exemple de Tokyo



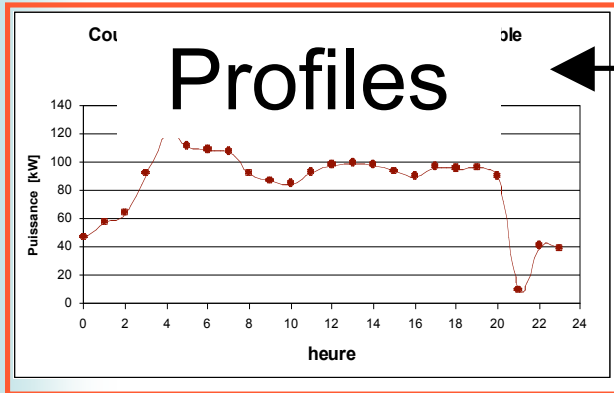


# Problématique

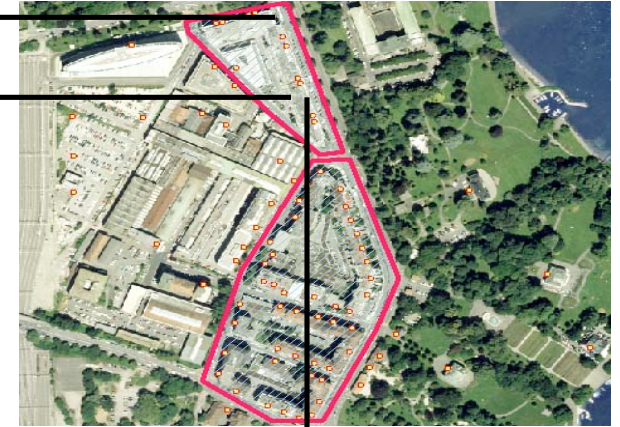
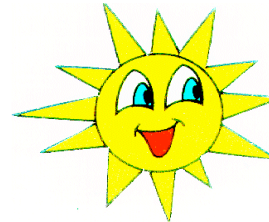


Quel(s) type(s) de technologie?  
Combien de technologies?  
Ou placer la/les technologie(s)?  
Comment connecter les bâtiments?

# Définition de systèmes énergétiques complexes



Sources d'énergie



Technologies existantes

Structuration  
de l'information

Technologies

Contraintes spatiales

Routage

Connections et  
noeuds possible

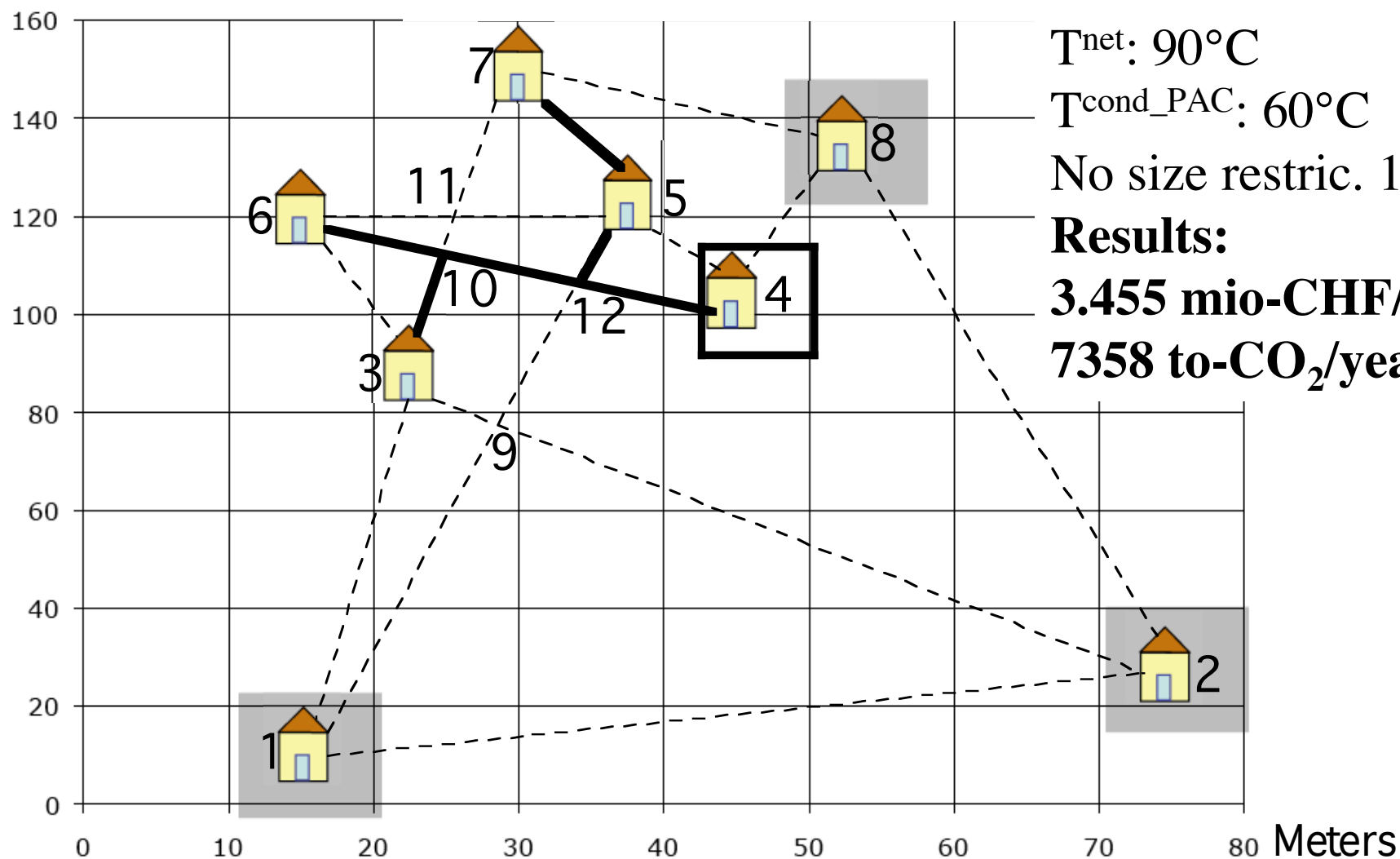


Emplacement des technologies centrales

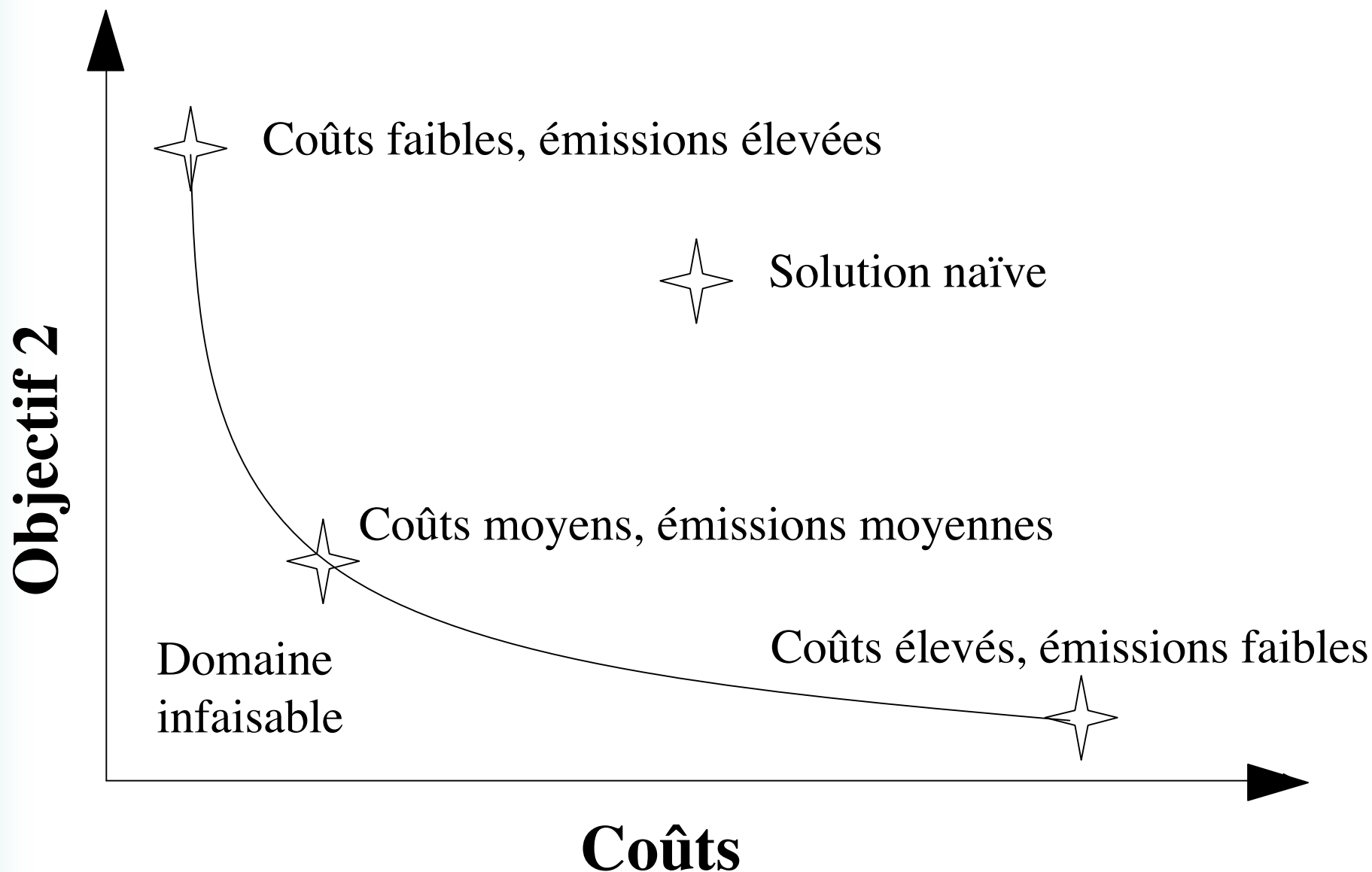


Emplacement des technologies décentralisées

Meters



# Courbe Pareto



# Conclusions

- L'efficacité exergetique est un indicateur particulièrement bien adapté à la comparaison de différents systèmes énergétiques complexes, contrairement à l'efficacité Premier Principe => Introduit dans la loi genevoise.
- L'optimisation multi-objectif (la courbe de Pareto) est un outil qui permet de structurer l'information et de définir les liens entre les objectifs => Aide à la décision pour l'implémentation de systèmes énergétiques durables.